

ANALIZA ODRŽIVOSTI URBANOG VODOOPSKRBNOG SUSTAVA POKRETANOG SUNČEVOM ENERGIJOM I ZAVISNOSTI VELIČINA NJEGOVIH POJEDINIH DIJELOVA

doc. dr. sc. Bojan Đurin, dipl. ing. geoteh.
Geotehnički fakultet Sveučilišta u Zagrebu
Hallerova aleja 7, 42000 Varaždin
bojan.djurin@gfv.hr

Lucija Baić, univ. bacc. ing. amb.
Geotehnički fakultet Sveučilišta u Zagrebu
Hallerova aleja 7, 42000 Varaždin

Moderni urbani vodoopskrbni sustavi zahtijevaju energetske i hidrauličke održivost. U posljednje vrijeme teži se korištenju obnovljivih izvora energije, a naročito solarne fotonaponske energije u svrhu proizvodnje električne energije za rad navedenih sustava. Korištenje solarnih fotonaponskih (FN) ćelija u svrhu proizvodnje električne energije za rad crpnih stanica, koje crpe vodu, je već dobro poznata i uhodana tehnologija. U pravilu se takvi sustavi sastoje od FN generatora, crpne stanice i vodospreme. Dosad su se za dimenzioniranje urbanih vodoopskrbnih sustava pokretanih FN energijom koristili pojednostavljeni postupci i metodologije koji su djelomično rješavali problem pouzdanosti i učinkovitosti vodoopskrbnih sustava. U ovom je radu prikazana i opisana Metoda kritičnog perioda (MKP), osmišljena upravo u tu svrhu, čime je napravljen matematički model kojim se dimenzioniraju energetske održive urbani vodoopskrbni sustavi (EOUVS). Pri tome su razmatrana dva načina formiranja ulaznih i izlaznih vremenskih serija svih veličina potrebnih za proračun. Nadalje, analizirane su funkcionalne zavisnosti veličina pojedinih dijelova urbanog vodoopskrbnog sustava dimenzioniranog takvom metodom, pri čemu se utvrdilo da između pojedinih dijelova postoji funkcionalna povezanost. Time se dobio detaljniji uvid u rad takvog sustava.

Ključne riječi: vodoopskrbni sustav, energetska i hidraulička održivost, solarna fotonaponska energija, Metoda kritičnog perioda, funkcionalna zavisnost.

1. UVOD

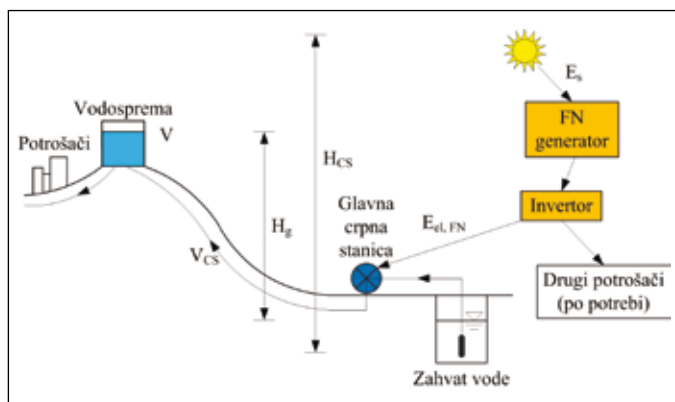
Solarna energija je primarna energija na Zemlji. Ona je izvor svih ostalih obnovljivih energija (vjetar, biomasa, hidroenergija, morski valovi). Zbog toga je ovaj izvor energije sa stajališta održivosti najpovoljniji. S druge strane, FN (fotonaponska) tehnologija je najjednostavnija sa značajnim trendom smanjenja cijene, te trendom povećanja učinkovitosti. Korištenje solarnih fotonaponskih ćelija u svrhu proizvodnje električne energije za rad crpnih stanica koje crpe vodu je već dobro poznata i uhodana tehnologija (Bakelli et al. 2011., Boizidi, 2013., Đurin i Margeta, 2014.). Međutim, njihovo korištenje, odnosno uklapanje u rad urbanog vodoopskrbnog sustava nije u potpunosti istraženo. U pravilu, takvi sustavi, odnosno urbani vodoopskrbni sustavi (UVS) koji koriste FN energiju, sastoje se od FN generatora i invertora (podsustav FN), vodospreme (podsustav V) i crpne stanice (podsustav CS).

Većim dijelom rad prikazuje i objašnjava, odnosno dan je naglasak na funkcionalne zavisnosti između pojedinih podsustava UVS-a (Podsustava FN, V i CS). Analiza navedenih zavisnosti nužne su radi cjelovitog shvaćanja načina rada UVS-a pokretanog FN energijom, koji primjenom Metode kritičnog perioda (dalje MKP) u stvari postaje energetske održivi urbani vodoopskrbni sustav (EOUVS). Uz navedeno, ovaj rad objašnjava znanstveno inovativnu i inženjerski primjenjivu metodologiju dimenzioniranja održivog urbanog vodoopskrbnog sustava pokretanog solarnom fotonaponskom energijom. Ta metodologija nazvana je Metodom kritičnog perioda (MKP) i ona je detaljno elaborirana i objašnjena u (Đurin i Margeta, 2014., Đurin, 2014.).

2. UKLAPANJE SOLARNOG FOTONAPONSKOG SUSTAVA U URBANI VODOOPSKRBNI SUSTAV

Rješenje koje se analizira sastoji se od četiri osnovna djela (slika 1):

- Solarno fotonaponsko postrojenje: solarni fotonaponski generator i inverter s pripadnom opremom – podsustav FN;
- Crpna stanica s pripadnom opremom – podsustav CS;
- Vodosprema s pripadnom opremom – podsustav V;



Slika 1: Energetski održivi urbani vodoopskrbni sustav (EOUVS)

Ti podsustavi čine integrirani tehnološki sustav i međusobno su funkcionalno povezani, pri čemu je nastao "Zeleni" odnosno Energetski održivi urbani vodoopskrbni sustav (EOUVS). To je sustav koji u suštini pretvara Sunčevu energiju iz okoline tijekom Sunčevog zračenja u električnu energiju u podsustavu FN, koja se koristi za crpljenje vode (mehanička energija) u vodospremu. Dakle, električna energija iz podsustava FN osigurava dovoljnu, a vodosprema kontinuiranu količinu vode za potrebe stanovništva, kao i potreban tlak za vodoopskrbnu mrežu. U ovom sustavu nisu predviđeni, niti su potrebni klasični spremnici električne energije (SEE) proizvedeni iz podsustava FN (baterije, akumulatori i slično). Umjesto toga, kao rješenje za SEE koristi se vodosprema.

Solarna energija je stohastičke prirode s obzirom na jakost i trajanje Sunčevog zračenja. Prema tome je uloga vodospreme kao spremnika vode, odnosno energije u sprezi sa mogućom proizvodnjom električne energije iz podsustava FN, ključna u osiguravanju kontinuiteta i sigurnosti opskrbe vodom. Zato se sustav mora odgovarajuće planirati i dimenzionirati, odnosno mora se primijeniti metodologija koja se u ovom radu opisuje. S obzirom na opseg i namjenu ovog rada, neće se objasniti uobičajena i dobro poznata metodologija za dimenzioniranje FN sustava, vodospreme i crpne stanice, no postupci dimenzioniranja mogu se naći u (Đurin, 2014., Đurin i Margeta, 2014., Kenna i Gillett, 1985.)

3. METODOLOGIJA DIMENZIONIRANJA I IZBORA RJEŠENJA ENERGETSKI ODRŽIVOG URBANOG VODOOPSKRBNOG SUSTAVA UZ KORIŠTENJE SOLARNE FOTONAPONSKJE ENERGIJE

3.1. Metoda kritičnog perioda

Prema (Đurin, 2014.), proizlazi da u slučaju korištenja FN energije za potrebe urbanog vodoopskrbnog sustava (UVODS-a) postoje tri kritična perioda. To su kritični period za dimenzioniranje podsustava FN (FN generator i inverter) $t_{Pel(i)}^*$, kritični period za dimenzioniranje podsustava CS (crpna stanica) $t_{CS(i)}^*$ i kritični period za dimenzioniranje podsustava V (vodosprema) $t_{Vop(i)}^*$. Ovisno o klimatskim značajkama lokacije i značajkama vodoopskrbnog sustava, gore spomenuti kritični periodi ne moraju se podudarati, ali i mogu.

3.1.1. Kritični period za dimenzioniranje podsustava FN (FN generator i inverter)

Prvi kritični period $t_{Pel(i)}^*$ definira se za određivanje dovoljne snage podsustava FN $P_{el, FN}$, koja će osigurati dovoljno električne enegije za crpljenje vode u vodospremu u svakom danu u karakterističnoj godini unutar cijelog planskog perioda N od više godina (obično 20 do 25 godina), sve u skladu sa režimom dnevne potrošnje vode u naselju. To je onaj period (periodi) u kojemu je za svaki dan u godini s obzirom na period bilanciranja t_b razlika $\Delta V_{Pel(i)}$ između potrebne dnevne količine vode za potrebe stanovništva $V_{dnev(i)}$ i precrpljene dnevne količine vode $V_{CS(i)}$ najmanja:

$$\Delta V_{Pel(i)} = V_{dnev(i)} - V_{CS(i)}, i = 1, 2, \dots, 365 \quad (1)$$

odnosno:

$$\min \Delta V_{Pel(i)} \Rightarrow t_{Pel(i)}^* \quad (2)$$

gdje je $\Delta V_{Pel(i)}$ prihvatljiva razlika u praktičnoj primjeni jednaka 0 ili eventualno neznatno veća od 0, obzirom da postoji i mogućnost osiguranja određene rezerve snage, odnosno precrpljene količine vode.

3.1.2. Kritični period za dimenzioniranje podsustava CS (crpna stanica)

Trajanje dnevnog Sunčevog zračenja $T_{s(i)}$ određuje mogući period rada crpne stanice. Samim time, uvodi se drugi po redu kritični period (periodi) $t_{CS(i)}^*$ za određivanje kapaciteta glavne crpne stanice (GCS) $t_{CS(i)}^*$. To je onaj kritični period (periodi) u kojem je odnos između dnevne potrošnje vode u naselju $V_{dnev(i)}$ i trajanja dnevnog Sunčevog zračenja $T_{s(i)}$ najmanji:

$$\max Q_{dnev} = \frac{V_{dnev(i)}}{T_{s(i)}} \Rightarrow t_{CS(i)}^* \quad (3)$$

Pri tome se podrazumijeva da je osigurana dovoljna snaga podsustava FN, $P_{el, FN}$, s obzirom na pripadni kritični period $t_{Pel(i)}^*$. Time se u skladu sa pravilima struke određuje kapacitet crpne stanice koji može precrpsti potrebnu količinu vode $Q_{sat(t)}$ (m^3/h), što u stvari predstavlja najveći satni protok tijekom karakteristične godine unutar planskog perioda. Kapacitet crpne stanice u iznosu $Q_{sat(t)}$ koristi se isključivo kod potisnih sustava bez vodospreme.

3.1.3. Kritični period za dimenzioniranje podsustava V (vodosprema)

Kritični period (periodi) $t_{Vop(i)}^*$ za određivanje operativnog volumena vodospreme V_{op} je onaj period kod kojega je najveća dnevna potrošnja vode u naselju $V_{dnev(i)}$ za svaki dan i najveća tijekom godine, pri čemu su jakost Sunčevog zračenja $E_{s(i)}$, kao i trajanje Sunčevog zračenja $T_{s(i)}$ zadovoljavajući, tako da podsustav FN može proizvesti dovoljnu količinu električne energije za pogon GCS. Pri tome se podrazumijeva da je osigurana dovoljna snaga podsustava PV, $P_{el, FN}$, s obzirom na pripadni kritični period $t_{Pel(i)}^*$ i dovoljan kapacitet podsustava CS, Q_{CS} , također s obzirom na pripadni kritični period $t_{CS(i)}^*$:

$$\max V_{dnev(i)} \Rightarrow t_{Vop(i)}^* \quad (4)$$

Najkraći mogući period bilanciranja t_b je jedan dan. Što je period bilanciranja t_b duži, to je rješenje u principu sigurnije, jer se sa duljim periodima bilanciranja postiže smanjenje utjecaja ekstremnih malih insolacija E_s na potrebni iznos snage podsustava FN, $P_{el, FN}$. Uz navedeno, sustav je učinkovitiji s obzirom na mogućnost korištenja Sunčevog zračenja, budući da je zbroj ukupne raspoložive sunčeve insolacije veći kad je t_b duži, jer se time eliminira utjecaj ekstremnih maksimalnih pojedinačnih dnevnih jakosti i trajanja Sunčevog zračenja. Samim time rješenje je sigurnije i racionalnije s obzirom na dimenzioniranje podsustava FN. To znači da se tražena količina vode može precrpsti sa manjom instaliranom snagom podsustava FN.

3.2. Formiranje članova vremenskih serija precrpljenih količina vode i potrebnih količina vode

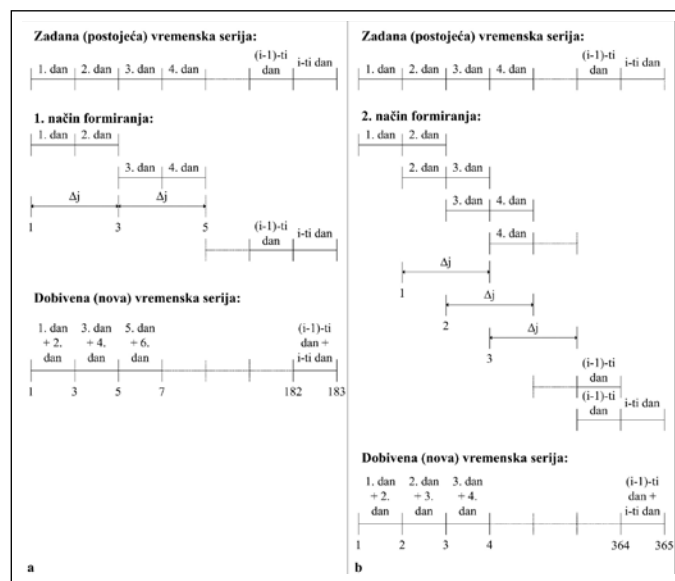
Predložena se metodologija zasniva na korištenju vremenskih serija u planskom periodu shodno odabranoj duljini perioda bilanciranja. Kod perioda bilanciranja t_b većih od jednog dana moguća su dva načina formiranja članova vremenskih serija. Isto tako, proračun se može raditi za jednu plansku godinu iz niza godina ili za niz od određenog broja godina unutar planskog perioda N ili za cijeli niz godina N .

Vremenske serije mogu se formirati na dva načina:

- (I.) kao skupovi od t_b dana u kojem se članovi niza ne preklapaju, odnosno skupovi se nadovezuju jedan na drugi bez preklapanja pojedinih dana;
- (II.) kao skupovi od t_b dana u kojem se članovi niza pomiču za $\Delta t = 1$ dan duž planskog (računskog) perioda.

Znači, u ovom se slučaju članovi niza preklapaju u broju dana koji iznosi $t_b - 1$.

Prvi način generira diskontinuirane veličine iz niza raspoloživih veličina, dok drugi način zbog preklapanja formira kontinuirane veličine slične zadanom (izvornom) nizu. Za očekivati je da se kod prvog načina (zbog nepreklapanja pojedinih dana) mogu pojaviti skokovi u vrijednostima pojedinih članova vremenskih serija, koji u konačnici mogu rezultirati odstupanjima u veličinama pojedinih dijelova EOUVS-a, odnosno podsustava FN, podsustava CS i podsustava V. Također se očekuje da kod drugog načina neće doći do skokova u vrijednostima pojedinih članova, odnosno da će eventualno ti skokovi biti manji u odnosu na prvi način.



Slika 2: Shematski prikaz načina formiranja članova vremenskih serija za period bilanciranja $t_b = 2$ dana

Na slici 2 prikazan je postupak formiranja vremenske serije za period bilanciranja $t_b = 2$ dana. Kod prvog načina (slika 2 a) formiraju se skupovi od $\Delta j = t_b$ dana (2 dana u prikazanom primjeru), pri čemu idući skup počinje od člana čiji je redni broj uvijek $(i \times t_b - t_b + 1)$. Drugim riječima, nema preklapanja pojedinih dana u godini. Za ovaj način formiranja vremenskih serija broj članova nove (formirane) serije jednak je omjeru broja dana u godini, dakle 365 (ili 366, ukoliko se radi o prijestupnoj godini) i pripadnog perioda bilanciranja t_b . U ovom slučaju, kod perioda bilanciranja $t_b = 2$ dana, broj članova nove (formirane) serije jednak je, sa zaokruživanjem, na cijelu vrijednost, 183 ($365/2$).

Kod drugog načina, (slika 2 b), korak Δj također je jednak t_b dana (odnosno 2 dana u prikazanom primjeru). Međutim, u ovom načinu idući skup počinje od člana čiji je redni broj uvijek $i - 1$. Drugim riječima, idući član vremenske serije se nastavlja na prethodni član. Za ovaj način formiranja vremenskih serija broj članova nove (formirane) serije jednak je broju dana u godini, dakle 365 (ili 366, ukoliko se radi o prijestupnoj godini).

U drugom slučaju, [slika 2 b](#), pojedini dani u godini se preklapaju jer se nova vremenska serija formira tako da se članovi zadane (postojeće) vremenske serije, s obzirom na pripadni period bilanciranja t_b , nastavljaju za pomak od jednog dana.

Ako se proračun radi za jednu odabranu godinu unutar planskog perioda N , tada su za 1. način formiranja za period bilanciranja t_b (u ovom slučaju $t_b = 2$ dana) nove (dobivene) vrijednosti dnevne precrcpljene količine vode $V_{CS(j)}^{(2)}$ idnevne potrebne količine vode $V_{dnev(j)}^{(2)}$ jednake:

$$\begin{aligned} V_{CS(j)}^{(2)} &= V_{CS(2i-1)} + V_{CS(2i)} \\ V_{dnev(j)}^{(2)} &= V_{dnev(2i-1)} + V_{dnev(2i)} \end{aligned} \quad (5)$$

pri čemu je $i = 1, 2, \dots, 365$ broj dana u godini, dok su članovi nove vremenske serije $j = 1, 2, \dots, 183$, uzevši u obzir ukupni broj dana u gowa po potrebi postupak završava sa početnim članom promatrane vremenske serije. Dakle, za $j = 1$, $V_{CS(1)}^{(2)} = V_{CS(1)} + V_{CS(2)}$, za $j = 2$, $V_{CS(2)}^{(2)} = V_{CS(3)} + V_{CS(4)}$, itd. Analogan postupak je i za $V_{dnev(1)}^{(2)}$, $V_{dnev(2)}^{(2)}$, itd.

Drugi način formiranja za isti period bilanciranja od $t_b = 2$ dana daje:

$$\begin{aligned} V_{CS(j)}^{(2)} &= V_{CS(i)} + V_{CS(i+1)} \\ V_{dnev(j)}^{(2)} &= V_{dnev(i)} + V_{dnev(i+1)} \end{aligned} \quad (6)$$

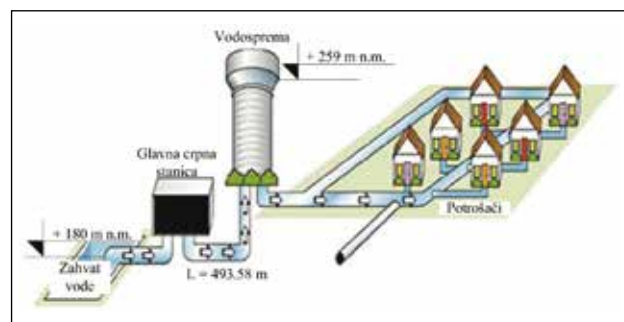
pri čemu je $i = 1, 2, \dots, 365$ broj dana u godini, dok su članovi nove vremenske serije $j = 1, 2, \dots, 365$. Dakle, za $j = 1$, $V_{CS(1)}^{(2)} = V_{CS(1)} + V_{CS(2)}$, za $j = 2$, $V_{CS(2)}^{(2)} = V_{CS(2)} + V_{CS(3)}$, itd. Analogan postupak je i za $V_{dnev(1)}^{(2)}$, $V_{dnev(2)}^{(2)}$, itd. U ovom se slučaju nove vremenske serije formiraju tako da se pomiču za jedan dan, te se u stvari svi dani u svakoj postojećoj (zadanoj) vremenskoj seriji preklapaju. Navedeno vrijedi za svaki period bilanciranja t_b .

4. PRIMJER

U ovom se poglavlju izračunavaju veličine analiziranog energetski održivog urbanog vodoopskrbnog sustava (EOUVS-a), u skladu sa predloženom metodologijom, nužne za njegovo dimenzioniranje, a to su: snaga podsustava FN (FN generator i inverter) $P_{e, FN}$, kapacitet Q_{CS} odnosno snaga P_{CS} podsustava CS (crpna stanica), te operativni volumen podsustava V (vodosprema) V_{op} , zajedno sa pripadnim kritičnim periodom (periodima) za dimenzioniranje podsustava FN, $t_{Pel(i)}$, podsustava CS, $t_{CS(i)}^*$ i podsustava V, $t_{Vop(i)}^*$. Navedeno se radi na dva opisana načina formiranja vremenskih serija, MKP-1 i MKP-2, za periode bilanciranja t_b od 1 do 5 dana.

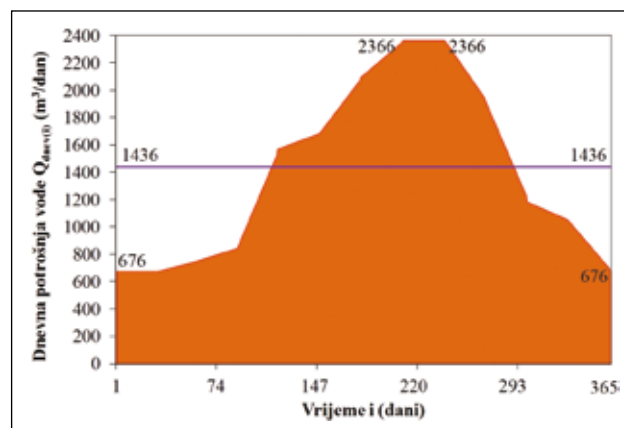
Analizira se primjer u kojem se sva proizvedena električna energija, potrebna za rad GCS-a, osigurava iz podsustava FN (FN generator i inverter). Razmatra se hipotetski primjer naselja koje ima populacijski ekvivalent od 8970 stanovnika i koje se nalazi u mediteranskom dijelu

Hrvatske. Naselje je smješteno na brdovitom području i ima jednu vodospremu koja se nalazi na nadmorskoj razini od 259 m n.m. Voda dotječe u vodospremu iz crpnog bazena glavne crpne stanice, koja se nalazi na nadmorskoj visini od 180 m n.m. Manometarska visina crpne stanice je 82.41 m. Položaj glavnih dijelova vodoopskrbnog sustava prikazan je na [slici 3](#).

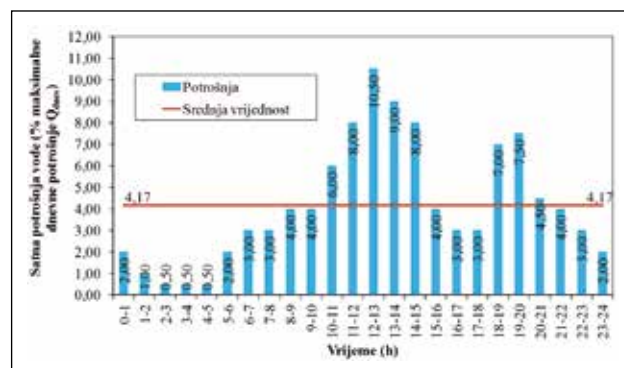


Slika 3: Shematski prikaz analiziranog urbanog vodoopskrbnog sustava (modificirano iz Đurin i Margeta, 2014.)

Režim dnevne potrošnje vode $Q_{dnev(i)}$ u jednoj godini za svaki pojedini dan i u toj godini prikazan je na [slici 4](#) (Đurin i Margeta, 2014.), dok je na [slici 5](#) prikazana satna potrošnja vode u naselju određena na osnovu dnevnog režima potrošnje vode (Đurin i Margeta, 2014.).



Slika 4: Režim dnevne potrošnje vode tijekom godine

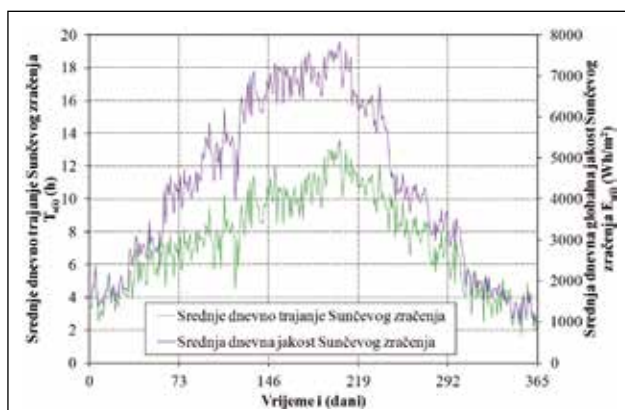


Slika 5: Režim satne potrošnje vode tijekom dana

Za razmatranu lokaciju proračunata prosječna manometarska visina H_{ps} iznosi 82.41 m, prosječna učinkovitost invertera je $\eta_i = 0.83$, dok je prosječna učinkovitost crpne stanice $\eta_{cs} = 0.90$. Prosječna

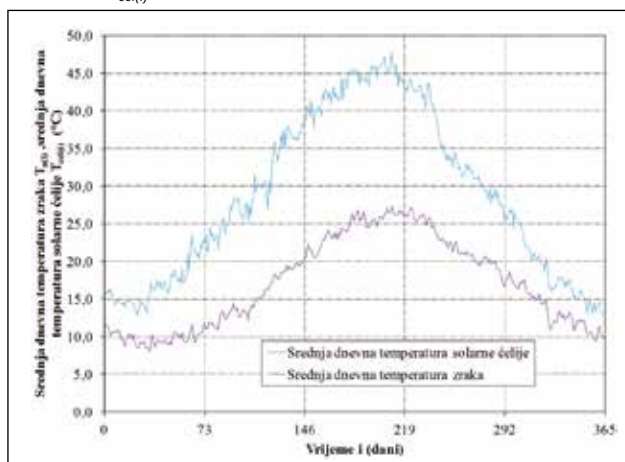
učinkovitost invertera i crpke je $\eta_{CS} = 0.75$, temperaturni koeficijent solarne ćelije iznosi $\alpha_c = 0.005 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, dok je temperatura solarne ćelije u standardnim testnim uvjetima $T_o = 25 \text{ } ^\circ\text{C}$. Usvojena učinkovitost podsustava FN iznosi $\eta_{PV} = 0.15$. Gubitci vode u ovoj analizi već su ubrojani u ukupne količine vode koje zahtijeva stanovništvo (Đurin i Margeta, 2014.).

Prosječna dnevna jakost globalnog sunčevog zračenja $E_{s(i)}$ na horizontalnu plohu i prosječno dnevno trajanje Sunčevog zračenja $T_{s(i)}$ prikazani su na slici 6.



Slika 6: Prosječna dnevna jakost i trajanje Sunčevog zračenja, (Đurin, 2014.)

Na slici 7 prikazane su srednje dnevne temperature zraka $T_{a(i)}$ ($^\circ\text{C}$), kao i srednja dnevna temperatura solarnih ćelija $T_{cell(i)}$ ($^\circ\text{C}$).



Slika 7: Prosječna dnevna temperatura zraka i solarne ćelije, (Đurin, 2014.)

5. DOBIVENI REZULTATI

5.1. Kritični period

Na osnovu prikazanih ulaznih podataka, te primjenom Metode kritičnog perioda (MKP) uz korištenje jednadžbi (2– 4), određen je kritični period (periodi) za dimenzioniranje podsustava FN (FN generator i inverter) $t_{Pel(i)}^*$ podsustava CS (crpna stanica) $t_{CS(i)}^*$ te podsustava V (vodosprema). Kritični periodi određeni su za oba načina bilanciranja (1. i 2. način bilanciranja) i prikazani u tablici 1.

Tablica 1: Kritični periodi za određivanje snage FN generatora i invertera $P_{el,FN}$ kapaciteta crpne stanice Q_{CS} i volumena vodospreme V_{op} za dva načina formiranja vremenskih serija, MKP-1 i MKP-2, za periode bilanciranja t_b od 1 do 5 dana

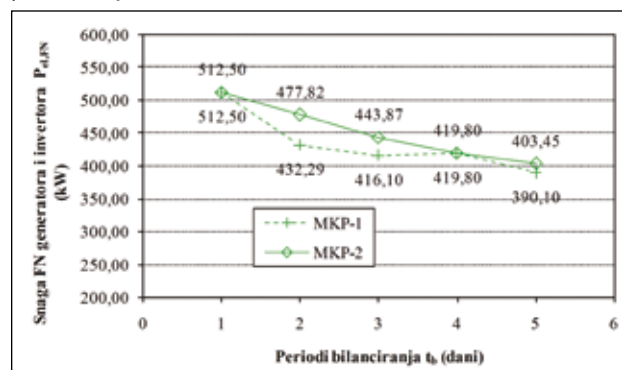
Period bilanciranja t_b (dani)	1	2	3	4	5
Kritični period (dani u godini) za podsustav FN $t_{Pel(i)}^*$	MKP-1 352	349-350	343-345	349-352	346-350
	MKP-2 352	344-345	344-346	349-352	348-352
Kritični period (dani u godini) za podsustav CS $t_{CS(i)}^*$	MKP-1 352	345-346	343-345	349-352	341-345
	MKP-2 352	344-345	344-346	344-347	343-347
Kritični period (dani u godini) za podsustav V $t_{Vop(i)}^*$	MKP-1 244	243-244	244-246	241-244	241-245
	MKP-2 244	244-245	243-245	243-246	242-246

Prvi način bilanciranja označen je sa MKP-1 (Metoda kritičnog perioda 1), dok je drugi način bilanciranja označen sa MKP-2 (Metoda kritičnog perioda 2), budući da su se vremenske serije formirale na dva načina. U skladu s time, kao rezultat, dobije se pet varijanti rješenja s obzirom na pet perioda bilanciranja t_b (od 1 do 5 dana), za svaki od oba načina formiranja vremenskih serija, MKP-1 i MKP-2.

Kao što se može vidjeti, kritični periodi se razlikuju, osim (očekivano) kod perioda bilanciranja $t_b = 1$ dan. Jasno se vidi da za dimenzioniranje podsustava FN i CS presudni utjecaj ima veličina jakosti Sunčevog zračenja E_s , koja je u zimskom periodu najmanja. Za dimenzioniranje podsustava V kritični period je tijekom ljetnog perioda kada su potrošnja vode, ali i jakost Sunčevog zračenja E_s , te trajanje Sunčevog zračenja T_s najveći.

5.2. Veličina podsustava FN (FN generator i inverter)

S obzirom na dobivene kritične dane prikazane u tablici 1, potrebna snaga podsustava FN, $P_{el,FN}$ za oba načina formiranja vremenskih serija MKP-1 i MKP-2, prikazana je na slici 8.



Slika 8: Proračunate snage podsustava FN $P_{el,FN}$ za oba načina formiranja vremenskih serija, MKP-1 i MKP-2, za periode bilanciranja t_b od 1 do 5 dana

Iz slike 8 vidljiv je trend pada vrijednosti snaga podsustava FN, $P_{el,FN}$ s povećanjem perioda bilanciranja t_b za oba načina formiranja vremenskih serija, MKP-1 i MKP-2. Kod vrijednosti snaga $P_{el,FN}$ za MKP-1 primjećuje se skok kod perioda bilanciranja $t_b = 4$ dana, dok kod MKP-2 nema skokova.

Za oba načina formiranja vremenskih serija, MKP-1 i MKP-2, kod varijante 1 dobivene su najveće snage podsustava FN, koje za MKP-1 i MKP-2 iznose $P_{el, FN} = 512.50$ kW. Najmanje snage za MKP-1 i MKP-2 dobivene su za varijantu 5, te one iznose za MKP-1 $P_{el, FN} = 390.10$ kW, te za MKP-2 $P_{el, FN} = 403.45$ kW. Razlike između najveće i najmanje vrijednosti snage $P_{el, FN}$ iznose 24 % za MKP-1, odnosno 21 % za MKP-2 %, dakle radi se o značajnim razlikama. Najveća razlika između snaga $P_{el, FN}$ dobivenih za različite periode bilanciranja t_b za MKP-1 i MKP-2 dobivena je za $t_b = 2$ dana i ona iznosi 45.53 kW, odnosno 10 %, dakle ta razlika nije značajna.

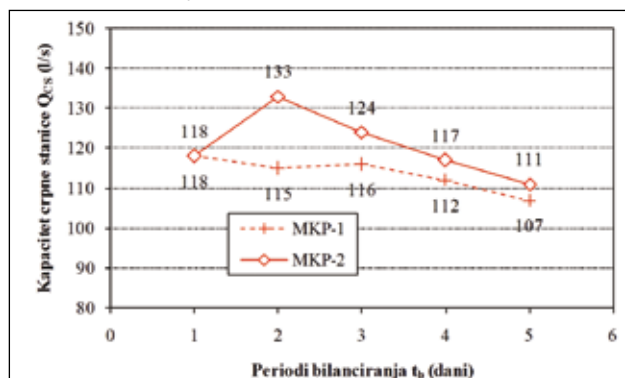
Trend smanjenja snage $P_{el, FN}$ u funkciji perioda bilanciranja t_b kod MKP-2 je približno linearan, $P_{el, FN} = -27.612 \times t_b + 534.324$, pri čemu je kvadrat koeficijenta determinacije jednak $R^2 = 0.979$. Kod MKP-1, dobivene veličine su takve da nisu pogodne za primjenu linearnog trenda, odnosno općenito nekog pretpostavljenog trenda. Iz ovih dobivenih rezultata zorno se vidi prednost korištenja MKP-2, jer je očito da je ovaj način formiranja vremenskih serija prirodniji. Kod MKP-1 pri periodu bilanciranja $t_b = 4$ dana primijećen je skok, odnosno povećanje vrijednosti snage $P_{el, PV}$ u odnosu na povećanje perioda bilanciranja t_b , slika 8. Navedeno se objašnjava povećanjem pripadne srednje vrijednosti i standardnog odstupanja vremenske serije jakosti sunčevog zračenja E_s za period bilanciranja $t_b = 4$ dana za MKP-1, tablica 2.

Tablica 2: Srednja vrijednost i standardno odstupanje vremenske serije jakosti Sunčevog zračenja E_s za oba načina formiranja vremenskih serija (MKP-1 i MKP-2) za periode bilanciranja t_b od 1 do 5 dana

Period bilanciranja t_b (dani)	MKP-1		MKP-2	
	Sred. vrij.	St. odstup.	Sred. vrij.	St. odstup.
1	4.30	2.05	4.30	2.05
2	3.63	1.72	4.01	1.90
3	3.49	1.66	3.73	1.76
4	3.51	1.68	3.52	1.67
5	3.24	1.55	3.39	1.60

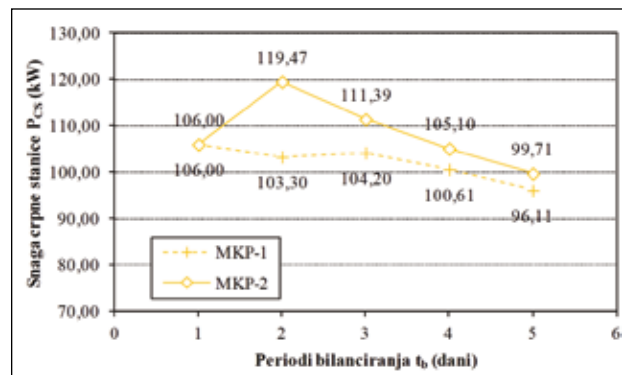
5.3. Veličina podsustava CS (crpna stanica)

Potrebni kapaciteti crpnih stanica Q_{CS} za oba načina formiranja vremenskih serija (MKP-1 i MKP-2) za periode bilanciranja t_b od 1 do 5 dana prikazani su na slici 9.



Slika 9: Proračunati kapaciteti crpne stanice Q_{CS} za oba načina formiranja vremenskih serija, MKP-1 i MKP-2, za periode bilanciranja t_b od 1 do 5 dana

Potrebne snage crpne stanice P_{CS} za oba načina formiranja vremenskih serija (MKP-1 i MKP-2) za periode bilanciranja t_b od 1 do 5 dana prikazane su na slici 10.



Slika 10: Proračunate snage crpne stanice P_{CS} za oba načina formiranja vremenskih serija, MKP-1 i MKP-2, za periode bilanciranja t_b od 1 do 5 dana

Veza između potrebnog kapaciteta crpne stanice Q_{CS} i snage crpne stanice P_{CS} je linearna. Iz slike 9 i 10, vidljivi su trendovi pada vrijednosti kapaciteta Q_{CS} i snage crpne stanice P_{CS} za oba načina formiranja vremenskih serija, MKP-1 i MKP-2. Kod vrijednosti snaga Q_{CS} i P_{CS} za MKP-1 nisu zabilježena prevelika odstupanja, dok kod MKP-2 za period bilanciranja $t_b = 2$ dana dolazi do izraženog skoka (povećanja vrijednosti). Ovaj izraženi skok je posljedica kratkog trajanja jakosti Sunčevog zračenja T_s , odnosno smanjenja T_s unutar kritičnog perioda za dimenzioniranje podsustava CS, $t_{CS(i)}^*$, kod $t_b = 2$ dana, što je posljedica stohastičke naravi Sunčevog zračenja.

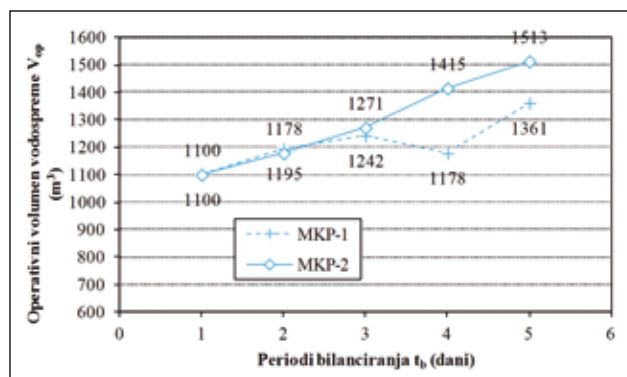
Veličine kapaciteta Q_{CS} i snage P_{CS} crpne stanice, prikazane na slikama 9 i 10, su takve naravi da nisu pogodne za primjenu linearnog trenda, odnosno općenito nekog pretpostavljenog trenda za MKP-1 i MKP-2.

Za MKP-1 kod varijante 1 dobiven je najveći kapacitet, a samim time i snaga crpne stanice, koja iznosi $Q_{CS} = 118$ l/s, odnosno $P_{CS} = 106$ kW. Najmanji kapacitet, odnosno snage crpne stanice kod MKP-1 dobivene su za varijantu 5, te oni iznose $Q_{CS} = 107$ l/s, odnosno $P_{CS} = 96.11$ kW. Razlike između najveće i najmanje vrijednosti kapaciteta Q_{CS} , odnosno snage P_{CS} za MKP-1 iznose 9 %, dakle međusobno se ne razlikuju značajno.

Za MKP-2 kod varijante 2 dobiven je najveći kapacitet, a samim time i snaga crpne stanice, koja iznosi $Q_{CS} = 133$ l/s, odnosno $P_{CS} = 119.47$ kW. Najmanji kapacitet, odnosno snaga crpne stanice za MKP-2 dobiveni su za varijantu 5 i oni iznose $Q_{CS} = 111$ l/s, odnosno $P_{CS} = 99.71$ kW. Razlike između najveće i najmanje vrijednosti kapaciteta Q_{CS} , odnosno snage P_{CS} iznose 17 % za MKP-2, dakle radi se o razlici koja nije pretjerano veća s obzirom na razliku kod MKP-1 (9 %). Najveća razlika između kapaciteta Q_{CS} , odnosno snaga P_{CS} crpne stanice dobivenih za različite periode bilanciranja t_b za MKP-1 i MKP-2 dobivena je za $t_b = 2$ dana i ona iznosi 18 l/s tj. 16.17 kW, odnosno 14 %, dakle ta razlika nije zanemariva.

5.4. Veličina podsustava V (vodosprema)

Operativni volumeni vodospreme V_{op} za oba načina formiranja vremenskih serija (MKP-1 i MKP-2) za periode bilanciranja t_b od 1 do 5 dana prikazani su na slici 11.



Slika 11: Proračunati operativni volumeni vodospreme V_{op} za oba načina formiranja vremenskih serija, MKP-1 i MKP-2, za periode bilanciranja t_b od 1 do 5 dana

Iz slike 11 vidljivi su trendovi povećanja vrijednosti operativnog volumena vodospreme V_{op} s povećanjem perioda bilanciranja t_b , za oba načina formiranja vremenskih serija, MKP-1 i MKP-2. Pri tome je trend povećanja volumena vodospreme V_{op} u funkciji perioda bilanciranja t_b kod MKP-2 približno linearan, $V_{op} = 106.3 \times t_b + 976.5$, pri čemu je kvadrat koeficijenta determinacije jednak $R^2 = 0.989$. Kod MKP-1, dobivene veličine su takve da nisu pogodne za primjenu linearnog trenda, odnosno općenito nekog pretpostavljenog trenda.

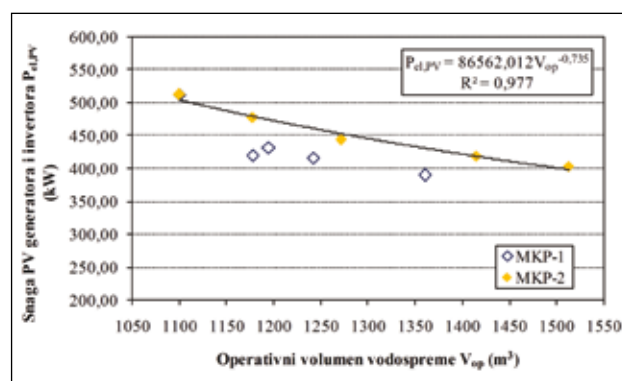
Kod vrijednosti V_{op} za MKP-1 primijećen je pad vrijednosti V_{op} kod perioda bilanciranja $t_b = 4$ dana, dok kod MKP-2 nema takvih skokova. Ovaj izraženi skok je posljedica kratkog trajanja jakosti Sunčevog zračenja T_s , odnosno smanjenja T_s unutar kritičnog perioda za dimenzioniranje podsustava V, $t_{Vop(l)}$, kod $t_b = 4$ dana, što je posljedica stohastičke naravi Sunčevog zračenja.

Za oba načina formiranja vremenskih serija, MKP-1 i MKP-2, kod varijante 1 dobivena je najmanja vrijednost volumena vodospreme, koja za MKP-1 i MKP-2 iznosi $V_{op} = 1100 m^3$. Najveći V_{op} za MKP-1 i MKP-2 dobiveni su za varijantu 5, te oni za MKP-1 iznose $V_{op} = 1361 m^3$, te za MKP-2 $V_{op} = 1513 m^3$. Razlike između najveće i najmanje vrijednosti snage V_{op} iznose 19 % za MKP-1, odnosno 27 % za MKP-2 %, dakle radi se o značajnim razlikama. Najveća razlika između volumena vodospreme V_{op} dobivenih za različite periode bilanciranja t_b za MKP-1 i MKP-2 dobivena je kod $t_b = 4$ dana i ona iznosi 237 m^3 , odnosno 17 %, dakle ta razlika nije zanemariva.

6. MEĐUSOBNA OVISNOST DOBIVENIH VELIČINA

Temeljem dobivenih rezultata analizirat će se ovisnost veličina sustava u funkciji perioda bilanciranja t_b , kako bi se utvrdila moguća zakonitost. Na osnovu dobivenih rezultata veličina podsustava FN (snage FN generatora i invertora $P_{el, FN}$) te potrebnih veličina podsustava V

(operativnog volumena vodospreme V_{op}), radi osiguranja vodoopskrbe utvrđena je funkcionalna zavisnost tih dviju veličina s obzirom na period bilanciranja t_b . Rezultati za dvije metode formiranja vremenskih serija, MKP-1 i MKP-2, grafički su prikazani na slici 12.

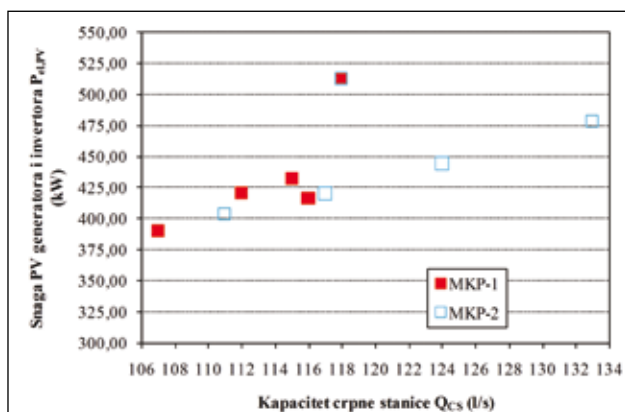


Slika 12: Funkcionalna zavisnost snage FN generatora i invertora $P_{el, FN}$ i operativnog volumena vodospreme V_{op} za MKP-1 i MKP-2

Vidljivo je da u slučaju vremenskih serija formiranih postupkom MKP-1 ne postoji zakonitost. Naime, za $t_b = 4$ dana dolazi do odstupanja u redosljedu poretka rezultata. Proizlazi da ovakav način formiranja vremenskih serija ne omogućava utvrđivanje generalizirane zakonitosti varijabli $P_{el, FN}$ i V_{op} . Isto je donekle očekivano, jer je serija dosta razlomljena i neprirodna, te kao takva ne osigurava kontinuitet funkcije kojom se opisuje. U drugom slučaju formiranja vremenskih serija MKP-2 zavisnost je očita kao i kontinuitet. Utvrđeno je da eksponencijska zavisnost najbolje povezuje parove vrijednosti $P_{el, FN}$ i V_{op} a što je utvrđeno i u prijašnjim istraživanjima, iako se u suštini ne radi o istom tipu problema (Glasnović i Margeta, 2011.).

Funkcionalna eksponencijska veza između $P_{el, FN}$ i V_{op} je značajnija, što pokazuje koeficijent determinacije R , odnosno kvadrat njegove vrijednosti $R^2 = 0.977$. Drugi način formiranja vremenskih serija MKP-2 je očito prirodniji, a time i pravilniji te daje realnije rezultate u funkciji veličine perioda bilanciranja t_b . Dobivena funkcionalna zavisnost omogućava empirijsku ekstrapolaciju te omogućava analizu mogućih rezultata za veće veličine t_b . Vidljivo je da produljenjem perioda bilanciranja opada veličina potrebne snage FN generatora i invertora, $P_{el, FN}$, a raste veličina potrebnog volumena vodospreme V_{op} . Trend promjena je sve manji i teži konačnoj veličini koja bi se dobila ako bi period bilanciranja t_b bio jednak periodu analize (godina dana ili više godina). Međutim, kod tog ne treba zaboraviti da su dobiveni parovi varijabli $P_{el, FN}$ i V_{op} za veličinu t_b diskretne veličine u funkciji diskretne veličine t_b , a ne kontinuirane, tako da je utvrđena funkcionalna zavisnost samo indikativna, a ne i potpuno točna. Ovakav odnos između stohastične ulazne veličine energije i determinističke izlazne veličine energije je očekivan, jer veći volumeni vodospreme umanjuju utjecaj pojedinih ekstremnih veličina vremenske serije jakosti Sunčevog zračenja (Sunčeve energije).

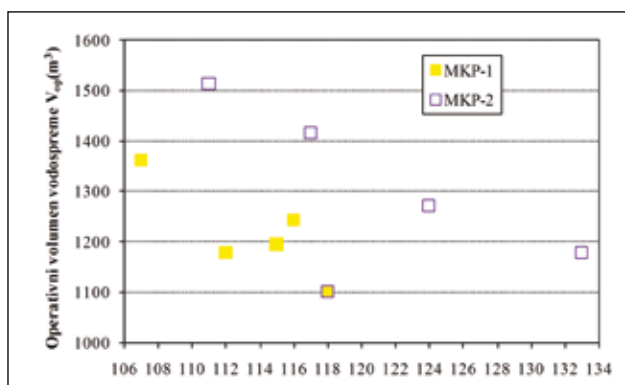
Kod podsustava CS, odnosno kod kapaciteta crpne stanice Q_{CS} (a samim time i pripadnih snaga crpne stanice P_{PS}) nema kontinuiteta poretka vrijednosti parova snage $P_{el, FN}$ i kapaciteta Q_{CS} , što se vidi sa slike 13, stoga nema potrebe analizirati trend.



Slika 13: Funkcionalna zavisnost snage FN generatora i invertora $P_{el, FN}$ i kapaciteta crpne stanice Q_{CS} za MKP-1 i MKP-2

Međutim, iz prikazanih rezultata je vidljiva osnovna i logična zakonitost između snage $P_{el, FN}$ i kapaciteta Q_{CS} , koja proizlazi iz funkcije crpne stanice u sustavu. Navedena ovisnost je proporcionalna. Veća snaga $P_{el, FN}$ znači i veći kapacitet Q_{CS} , odnosno dulji period bilanciranja t_b znači manju snagu $P_{el, FN}$ a time i manju potrebnu snagu Q_{CS} .

Slično se može zaključiti i za vezu između operativnog volumena vodospreme V_{op} i kapaciteta crpne stanice Q_{CS} (a samim time i pripadnih snaga crpne stanice P_{PS}). Nema kontinuiteta poretka vrijednosti parova tih dviju spomenutih vrijednosti, slika 14, stoga nema potrebe analizirati trend, odnosno korelaciju između tih dviju vrijednosti.



Slika 14: Funkcionalna zavisnost operativnog volumena vodospreme V_{op} i kapaciteta crpne stanice Q_{CS} za MKP-1 i MKP-2

Međutim, iz prikazanih rezultata vidljiva je osnovna i logična zakonitost između operativnog volumena vodospreme V_{op} i kapaciteta crpne stanice Q_{CS} , koja proizlazi iz funkcije crpne stanice u sustavu povezanosti kapaciteta Q_{CS} sa snagom $P_{el, FN}$. Veći kapacitet Q_{CS} znači manji operativni volumen V_{op} , odnosno dulji period bilanciranja t_b znači veći operativni volumen V_{op} , a time i manju potrebnu snagu $P_{el, FN}$.

Iz navedenog prikaza vidljivo je da period bilanciranja ima značajan utjecaj na veličine objekata (podsustava) u sustavu. Isto se može očekivati i u slučaju drugačijih klimatskih regija, ali s drugačijim veličinama. Stoga su prikazani rezultati dobar pokazatelj ponašanja sustava i metode dimenzioniranja sustava.

7. ZAKLJUČAK

U ovome je radu prikazana analiza funkcionalne zavisnosti između pojedinih podsustava urbanog vodoopskrbnog sustava (UVS-a) pokretanog FN energijom s ciljem boljeg i cjelovitijeg shvaćanja načina njegova rada. Uz navedeno, prikazana je i Metoda kritičnog perioda, primjenom koje UVS postaje energetske održivi urbani vodoopskrbni sustav (EOUVS). Dobivene razlike funkcionalnih dijelova EOUVS-a prikazuju funkcionalnu eksponencijsku između snage podsustava FN i volumena vodospreme, dok takve povezanosti nema između ostalih dijelova sustava. Prema svemu tome može se zaključiti da spremnik uz svoju hidrauličku ulogu pohranjivanja vode također ima i ulogu spremnika energije kroz dokazanu funkcionalnu povezanost s izvorom energije, što je u ovom slučaju podsustav FN. Rezultati dobiveni korištenjem metode za formiranje vremenskih serija MKP-2 prikazuju jednostavnu i dosljednu vezu između operativnog volumena spremnika V_{op} i kapaciteta crpne stanice Q_{CS} . Ta funkcionalna zavisnost veličina pojedinih dijelova EOUVS-a vidi se iz sljedećih zaključaka: veći kapacitet Q_{CS} znači i manji operativni volumen V_{op} , dok dulji period bilanciranja t_b znači veći operativni volumen V_{op} , što daje zahtjeve za manjom potrebnom snagom $P_{el, FN}$. Ova znanstveno inovativna i inženjerski primjenjiva metoda daje rezultate koji mogu biti primjenjeni na područjima različitih klimatskih regija sa drugim ulaznim vrijednostima, što dokazuje da je ova metoda dimenzioniranja sustava također i dobar indikator samog ponašanja EOUVS-a. ■

LITERATURA

- Bakelli, Y.; Hadj, A. A.; Azoui, B. (2011): Optimal sizing of photovoltaic pumping system with water tank storage using LPSP concept. *Solar Energy*, 85, 288-294.
- Boizidi, B. (2013.): New sizing method of PV water pumping systems. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 4, 1-10.
- Đurin, B. (2014.): Održivost rada urbanog vodoopskrbnog sustava. Disertacija. Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije Sveučilišta u Splitu, Split.
- Đurin, B. (2016.): Some Aspects of the Operation Work of Pump Station and Water Reservoir. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 60(3), 345-353.
- Đurin, B.; Margeta, J. (2014.): Analysis of the Possible Use of Solar Photovoltaic Energy in Urban Water Supply Systems. *Water*, 6, 1546-1561.
- Đurin, B.; Margeta, J.; Bojanić, D. (2015.): The Impact of the Water Consumption Regime on the Work of Reservoirs. *E-Water*, 1, 1-21.
- Glasnović, Z.; Margeta, J. (2011.): Vision of total renewable electricity scenario. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 1873-1884.
- Kenna, J.; Gillett, W. B. (1985.): *Solar Water Pumping: A Handbook*. Intermediate Technology Publications, London, U.K.

Sustainability analysis of urban water supply systems powered by solar energy and dependencies of the sizes of its individual parts

Abstract. Modern urban water supply systems require energy sustainability as well as hydraulic sustainability. In recent times, efforts have been made to use renewable energy sources, particularly solar photovoltaic energy for the electrical power generation necessary for the operation of these systems. The use of solar photovoltaic (PV) cells for electricity production needed to operate water pumping stations is already a well-known, established technology. Such systems typically consist of a PV generator, pumping station and water tank. To date, the dimensioning of urban water supply systems operated with PV energy have utilized simplified procedures and methodologies which partially solved the problem of reliability and efficiency of these water supply systems. The paper presents and describes the Critical Period Method (CPM) designed for this purpose, which has devised a mathematical model for dimensioning energy sustainable urban water supply systems (ESUWSS). In doing so, two manners of forming input and output time series of all sizes necessary for the calculation were considered. Additionally, functional dependencies of the sizes of individual parts of urban water supply systems dimensioned by the application of this method were analysed. It has been determined that there is a functional dependency between the individual parts, thus providing a better insight into the operation of such systems.

Key words: water supply system, energy and hydraulic sustainability, solar photovoltaics, Critical Period Method, functional dependency.

Analyse der Nachhaltigkeit des mit Solarenergie versorgten Wasserversorgungssystems und der Abhängigkeit der Größen einzelner Komponenten

Zusammenfassung. Moderne städtische Wasserversorgungssysteme sollen energetisch und hydraulisch nachhaltig sein. Neulich strebt man die Nutzung von erneuerbaren Energiequellen an, namentlich die Photovoltaik (PV), die genutzt wird, Wasserversorgungssysteme mit Strom zu versorgen. Die Photovoltaik betriebenen Wasserpumpen gehören zu bereits bekannten und oft genutzten Technologien. In der Regel besteht ein solches System aus PV-Generator, Wasserpumpe und Wassertank. Bisher wurden vereinfachte Verfahren und Methoden zur Dimensionierung von städtischen, mit PV-Strom betriebenen Wasserversorgungssystemen angewendet, die nur teilweise das Problem der Verlässlichkeit und Effizienz des Wasserversorgungssystems lösen konnten. In diesem Beitrag wird eine speziell entwickelte Methode des kritischen Zeitraums dargestellt, die ein mathematisches Modell zur Dimensionierung von energetisch nachhaltigen städtischen Wasserversorgungssystemen einschließt. Zwei Arten der Entstehung von Eingangs- und Ausgangszeitserien aller für die Berechnung erforderlichen Größen wurden in Betracht gezogen. Außerdem wurden die funktionalen Abhängigkeiten der Größen einzelner Komponenten des städtischen, mit dieser Methode dimensionierten Wasserversorgungssystems analysiert, was zur Schlussfolgerung führte, dass zwischen einzelnen Komponenten eine funktionale Abhängigkeit besteht. Somit konnte man eine detaillierte Einsicht in das Verhalten eines solchen Systems erhalten.

Schlüsselwörter: Wasserversorgungssystem, energetische und hydraulische Nachhaltigkeit, Methode des kritischen Zeitraums, funktionale Abhängigkeit